

УДК 579.66:58.02:58.04

Л.В. Литвиненко, А.В. Тищенко

## ИЗУЧЕНИЕ ФИТОТОКСИЧНОСТИ НИКЕЛЯ В ПРИСУТСТВИИ *RHODOCOCCUS*-БИОСУРФАКТАНТОВ

Исследовано влияние *Rhodococcus*-биосурфактантов гликолипидной природы на эффективность прорастания семян сельскохозяйственных культур растений: вики полевой (*Vicia sativa* L.), горчицы белой (*Sinapis alba* L.) и овса посевного (*Avena sativa* L.) в условиях загрязнения сульфатом никеля. Биосурфактанты способствуют ослаблению негативного воздействия никеля за счёт их десорбции от компонентов почвы с последующим образованием стабильных комплексов «биосурфактант-металл», а также стимулируют рост корневой системы растений. Обнаружено снижение (до 4 раз) фитотоксичности никеля в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов. Установлено, что предварительная обработка семян растений *Rhodococcus*-биосурфактантами приводит к повышению (до 21 раза) энергии прорастания и всхожести семян, более интенсивному росту корней и побегов проросших семян в присутствии никеля. Полученные сведения могут быть использованы при разработке экологически безопасного способа снижения токсического действия никеля на рост сельскохозяйственных культур растений в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов.

*Ключевые слова:* *Rhodococcus*-биосурфактанты, сульфат никеля, тяжелые металлы, устойчивость, *Vicia sativa* L., *Sinapis alba* L., *Avena sativa* L.

Возрастающее загрязнение окружающей среды техногенными отходами негативно влияет как на природные, так и антропогенные экосистемы. Наиболее опасными среди широкого спектра эмерджентных поллютантов являются тяжелые металлы (ТМ). В отличие от таких объектов окружающей среды, как воздух и вода, в которых достаточно интенсивно происходят процессы самоочищения, почва обладает данным свойством лишь в незначительной мере [1].

Никель относится к немногочисленной группе ТМ, которые необходимы для нормального развития живых организмов. Никель оказывает влияние на ферментативные процессы, окисление аскорбиновой кислоты, ускоряет переход сульфгидрильных групп в дисульфидные. Никель входит в состав многих ферментов: уреаз; никельсодержащих гидрогеназ; дегидрогеназ; Ni-зависимых супероксиддисмутаз; метиллендеуреаз; метилкоэнзим-М-редуктаз; ацетил-КоА-декарбоксилаз, а также ряда синтаз [2; 3].

По степени вредного воздействия никель входит в группу умеренно опасных веществ (2 класс опасности) в соответствии с приказом Министерства природных ресурсов РФ от 04.12.2014 г. № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I–V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» [4]. Известно, что в высоких концентрациях соединения никеля оказывают негативное воздействие на живые организмы. Избыток никеля в организме высших животных и человека может привести к поражению легких и кожи, носовым кровотечениям, гиперемии зева, а также раку легких [5].

Негативное влияние повышенных концентраций никеля на высшие растения заключается в ингибировании роста корней, а также нарушении целостности структуры и физиолого-биохимических функций растительных клеток [6]. Даже низкие дозы внесения этого элемента в почву способствуют многократному увеличению содержания никеля в различных органах растения, в том числе и генеративных, что определяет высокую вероятность его токсического действия в низких концентрациях на растительный организм. По сравнению с другими ТМ, никель обладает специфическими особенностями воздействия на растения. Однако обнаружено и наличие общих с другими ТМ механизмов нарушения минерального питания, водного режима, фотосинтеза и морфогенеза растений, а также единой программы ответа клетки, которая направлена на детоксикацию поллютанта [7].

Известно, что внесение биосурфактантов в почву, загрязненную ТМ, способствует повышению их биодоступности и облегчает аккумуляцию металлов микробными клетками [5]. При этом влияние сурфактантов биогенного происхождения на высшие растения в условиях загрязнения ТМ практически не изучено. По нашим данным, *Rhodococcus*-биосурфактанты гликолипидной природы, синтезируемые актинобактериями рода *Rhodococcus*, способствуют ослаблению негативного воздействия ТМ на рост растений за счет их десорбции от компонентов почвы с последующим образованием стабильных комплексов «биосурфактант–металл» [8-10].

Цель настоящего исследования – оценка влияния *Rhodococcus*-биосурфактантов на прорастание семян вики полевой, горчицы белой и овса посевного в условиях загрязнения никелем.

### Материалы и методы исследований

В сравнительных экспериментах изучали влияние *Rhodococcus*-биосурфактантов (в концентрациях 2.0, 4.0 и 8.0 г/л воды) на фитотоксичность сульфата никеля ( $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) в отношении всхожести семян растений: овса посевного (*Avena sativa* L.), горчицы белой (*Sinapis alba* L.) и вики полевой (*Vicia sativa* L.). Растворы соли никеля вносили в количестве 1, 10, 50, 100 и 200 предельно-допустимых концентраций (ПДК), что составило по Ni – 4.0, 40.0, 200.0, 400.0 и 800.0 мг/кг почвы с учетом фона (кларка), соответственно [11]. Дозы никеля определяли по содержанию элемента в химически чистой соли. Содержание металла рассчитывали на основании атомных масс. Уровень фитотоксичности определяли в соответствии со стандартными Методическими рекомендациями МР 2.1.7.2297-07 «Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности (Фитотест)» [12]. Эксперименты по определению фитотоксичности проводили на базе учебного ботанического сада Пермского государственного национального исследовательского университета. Условия проращивания: подсветка белыми люминесцентными лампами, спектр которых максимально приближен к дневному свету; температура 23–25°C; pH 6.3–6.5.

Таблица 1

**Влияние никеля на энергию прорастания (%) семян в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов**

Варианты экспериментов*	Овёс посевной		Горчица белая		Вика полевая	
	БС С <sub>12</sub>	БС С <sub>16</sub>	БС С <sub>12</sub>	БС С <sub>16</sub>	БС С <sub>12</sub>	БС С <sub>16</sub>
Контроль		90		84		91
Ni <sup>2+</sup> 1 ПДК		83		49		84
Ni <sup>2+</sup> 10 ПДК		80		30		36
Ni <sup>2+</sup> 50 ПДК		71		2		0
Ni <sup>2+</sup> 100 ПДК		52		0		0
Ni <sup>2+</sup> 200 ПДК		11		0		0
БС 2 г/л	92	91	86	85	89	89
БС 4 г/л	94	92	88	87	92	93
БС 8 г/л	89	88	86	84	90	89
1 ПДК / 2 г/л	89	88	76	74	90	88
1 ПДК / 4 г/л	93	92	82	85	94	90
1 ПДК / 8 г/л	91	91	78	73	91	89
10 ПДК / 2 г/л	90	89	60	63	91	83
10 ПДК / 4 г/л	92	91	63	67	94	89
10 ПДК / 8 г/л	90	90	59	65	90	85
50 ПДК / 2 г/л	81	84	35	43	28	35
50 ПДК / 4 г/л	83	81	39	41	32	41
50 ПДК / 8 г/л	80	79	36	31	25	33
100 ПДК / 2 г/л	67	65	0	0	0	21
100 ПДК / 4 г/л	70	60	0	0	0	26
100 ПДК / 8 г/л	65	69	0	0	0	24
200 ПДК / 2 г/л	28	25	0	0	0	0
200 ПДК / 4 г/л	30	26	0	0	0	10
200 ПДК / 8 г/л	25	23	0	0	0	0

Примечание. \*Представлены растворы сульфата никеля, ПДК / *Rhodococcus*-биосурфактантов, г/л.

В работе использовали штамм актинобактерий *Rhodococcus ruber* ИЭГМ 231 из Региональной профилированной коллекции алканотрофных микроорганизмов (акроним коллекции ИЭГМ, номер 768 во Всемирной федерации коллекций культур; www.iegmcoll.ru; реестровый номер www.ckr-rf.ru/usu/73559). Бактериальную культуру выращивали в среде RS (*Rhodococcus* Surfactant) на орбитальном шейкере (160 об/мин, 28°C) в течение 7 сут. Состав среды RS (г/л):  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  – 2.0;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 2.0;  $\text{KNO}_3$  – 1.0;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  – 2.0;  $\text{NaCl}$  – 1.0;  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 0.2;  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  – 0.02;  $\text{FeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  – 0.01

[11]. В качестве единственного источника углерода и энергии использовали *n*-додекан ( $C_{12}$ ) либо *n*-гексадекан ( $C_{16}$ ) в концентрации 3 об. %. Неочищенные *Rhodococcus*-биосурфактантные комплексы гликолипидной природы, продуцируемые родококками, получали методом [13]. Для этого 5–7 суточную бактериальную культуру отстаивали в делительной воронке, после чего сливали нижний прозрачный водный слой. Оставшуюся однородную гидрофобную маслянистую массу подвергали ультразвуковому озвучиванию (30 мин) в условиях обязательного охлаждения. Для условного обозначения *Rhodococcus*-биосурфактантов (БС), продуцируемых родококками в жидкой минеральной среде с *n*-додеканом или *n*-гексадеканом, использованы термины *Rhodococcus*-биосурфактанты  $C_{12}$  и *Rhodococcus*-биосурфактанты  $C_{16}$ , соответственно.

Эксперименты по проращиванию семян проводили в трёхкратной повторности. В чашку Петри помещали по 25 здоровых сухих семян, добавляли 5 мл эмульсии *Rhodococcus*-биосурфактантов, а также сульфата никеля в разных концентрациях. В качестве контроля использовали (1) дистиллированную воду, (2) водный раствор биосурфактантов, (3) водный раствор сульфата никеля. Энергию прорастания определяли на 3-и сутки, всхожесть и длину проростков – на 7 сутки эксперимента. Статистическую обработку полученных результатов проводили стандартными методами с помощью пакета компьютерных программ Microsoft Excel 2007 (Microsoft Inc., 2007).

### Результаты и их обсуждение

Как видно из табл. 1, энергия прорастания семян всех использованных в работе видов растений в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов от 1.5 до 21.0 раза выше, по сравнению с таковой в условиях загрязнения сульфатом никеля (табл. 1).

Таблица 2

#### Влияние никеля на формирование побегов и корневой системы (мм) проростков овса, горчицы и вики в присутствии БС $C_{12}$

Варианты экспериментов*	Овес посевной		Горчица белая		Вика полевая	
	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня
Контроль	14.0±8.5	28.8±11.7	25.3±3.7	27.4±9.1	12.1±1.9	13.0±1.8
Ni <sup>2+</sup> 1 ПДК	25.3±4.2	21.3±3.9	7.7±3.8	14.5±2.3	6.7±1.2	3.8±0.9
Ni <sup>2+</sup> 10 ПДК	10.1±2.4	23.1±4.5	5.1±0.5	–	3.5±0.7	–
Ni <sup>2+</sup> 50 ПДК	6.3±1.9	17.3±3.2	3.0±0.7	–	–	–
Ni <sup>2+</sup> 100 ПДК	5.1±0.6	12.3±1.8	–	–	–	–
Ni <sup>2+</sup> 200 ПДК	1.8±0.4	2.0±0	–	–	–	–
БС 2 г/л	55.7±14.4	48.4±9.5	32.2±8.7	31.7±3.0	30.8±2.6	18.2±3.0
БС 4 г/л	67.4±5.7	53.0±6.1	39.7±6.7	37.0±3.8	32.5±1.8	29.3±3.4
БС 8 г/л	45.1±5.2	35.1±3.2	24.6±5.0	26.2±8.0	27.0±2.0	22.3±3.4
1 ПДК / 2 г/л	28.1±2.3	35.6±2.4	14.3±2.4	22.5±1.9	12.1±2.1	14.5±1.4
1 ПДК / 4 г/л	40.6±3.1	42.2±2.4	19.8±1.2	25.3±1.5	14.7±2.4	15.3±1.2
1 ПДК / 8 г/л	27.3±4.2	34.7±1.2	12.8±0.2	20.2±0.8	12.5±1.6	14.3±1.2
10 ПДК / 2 г/л	24.3±1.6	37.2±1.6	8.6±1.2	15.5±0.7	6.4±1.2	4.5±1.8
10 ПДК / 4 г/л	29.8±2.0	35.8±1.4	18.1±1.7	17.6±0.8	8.9±2.0	8.5±0.5
10 ПДК / 8 г/л	22.3±1.7	30.9±2.0	12.6±1.4	14.8±5.0	4.2±1.4	3.6±0.1
50 ПДК / 2 г/л	12.5±3.0	25.0±0.5	12.1±0.3	–	–	–
50 ПДК / 4 г/л	14.1±1.3	28.5±1.8	14.5±0.4	–	–	–
50 ПДК / 8 г/л	13.1±2.4	25.3±2.1	10.6±1.2	–	–	–
100 ПДК / 2 г/л	14.1±1.5	21.5±2.1	–	–	–	–

Примечание. \*Представлены растворы сульфата никеля / *Rhodococcus*-биосурфактантов (ПДК / г/л). Угнетение роста корней и побегов показано символом «–».

В табл. 2 представлены результаты влияния ионов Ni<sup>2+</sup> на прорастание семян растений в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов  $C_{12}$ . Наиболее интенсивная всхожесть, а также формирование корней и побегов проростков выявлены нами у овса, семена которого прорастали даже при концентрации ионов Ni<sup>2+</sup> 200 ПДК. При этом никель в концентрации  $\geq 10$  ПДК полностью ингибировал про-

цессы всхожести семян горчицы и вики, тогда как в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов прорастание семян составляло более 50 % даже при концентрации никеля 50 ПДК. Обработка семян *Rhodococcus*-биосурфактантами  $C_{12}$  снижала токсичность никеля и способствовала более интенсивному росту корней и побегов исследуемых растений в 1.5–4.5 раза по сравнению с прорастанием семян в среде, загрязненной никелем без предварительной обработки их биосурфактантами.

Подобная тенденция наблюдалась при проведении экспериментов по изучению влияния *Rhodococcus*-биосурфактантов  $C_{16}$  на процессы прорастания семян исследованных растений в условиях загрязнения никелем (табл. 3).

Таблица 3

**Влияние никеля на формирование побегов и корневой системы (мм) проростков овса, горчицы и вики в присутствии БС  $C_{16}$**

Вариант экспериментов*	Овес посевной		Горчица белая		Вика полевая	
	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня	Длина побега	Длина корня
БС 2 г/л	39.5±26.0	41.8±21.3	30.5±11.1	33.6±26.3	29.2±2.8	12.6±0.4
БС 4 г/л	31.9±3.5	35.3±6.8	27.9±4.3	33.8±10.1	31.8±1.7	16.2±2.2
БС 8 г/л	23.5±7.0	23.9±9.1	20.5±3.7	40.2±14.8	30.8±1.8	10.1±0.6
1 ПДК / 2 г/л	34.9±5.2	42.6±3.2	24.2±2.9	24.8±4.5	18.0±1.4	8.4±0.2
1 ПДК / 4 г/л	47.2±1.7	44.2±1.4	24.7±0.5	18.0±1.6	27.0±2.9	14.1±1.6
1 ПДК / 8 г/л	42.5±1.5	38.1±1.1	20.9±2.0	21.9±1.8	19.4±1.8	12.3±0.8
10 ПДК / 2 г/л	37.3±1.7	33.1±2.0	19.9±2.2	8.5±3.1	17.6±1.9	–
10 ПДК / 4 г/л	47.7±3.5	33.8±1.7	19.8±1.3	12.4±1.5	15.4±0.8	–
10 ПДК / 8 г/л	43.4±1.1	31.6±1.8	21.9±0.3	9.4±1.3	14.6±1.3	–
50 ПДК / 2 г/л	22.9±1.7	27.7±1.5	9.9±0.8	8.2±0.4	8.6±0.6	–
50 ПДК / 4 г/л	37.4±1.8	24.3±1.4	12.4±1.3	10.1±0.6	9.5±1.4	–
50 ПДК / 8 г/л	40.2±2.0	22.1±1.9	9.2±1.1	7.5±1.7	4.6±0.2	–
100 ПДК / 2 г/л	20.8±1.6	26.5±1.4	–	–	9.3±0.3	–
100 ПДК / 4 г/л	22.5±0.2	27.1±2.0	–	–	11.2±2.7	–
100 ПДК / 8 г/л	21.4±3.1	25.3±1.2	–	–	11.0±1.6	–
200 ПДК / 2 г/л	10.4±1.2	5.7±0.9	–	–	–	–
200 ПДК / 4 г/л	12.5±0.4	6.5±0.3	–	–	8.7±1.5	–
200 ПДК / 8 г/л	9.3±1.6	3.9±0.6	–	–	–	–

Примечание. \*Представлены растворы сульфата никеля / *Rhodococcus*-биосурфактантов (ПДК / г/л). Угнетение роста корней и побегов показано символом «–».

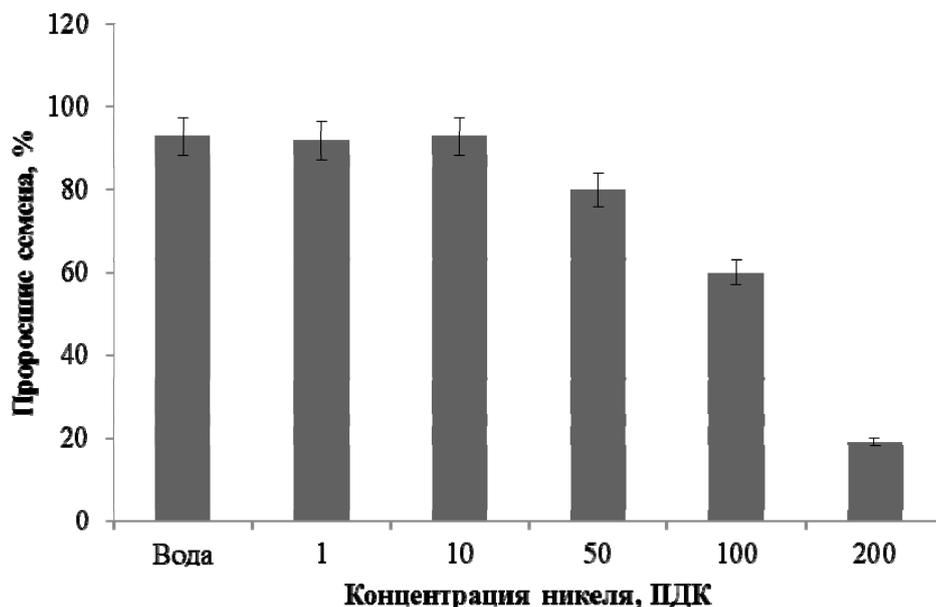


Рис. 1. Всхожесть семян овса посевного в условиях загрязнения никелем (ПДК, мг/кг почвы)

На рис. 1 представлены результаты всхожести семян овса посевного в присутствии сульфата никеля. Количество проросших семян колеблется от 19 до 93 % в зависимости от концентрации ТМ в среде прорастания. Как видно из рис. 2, всхожесть семян овса в условиях загрязнения ионами никеля до 2 раз выше в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов.

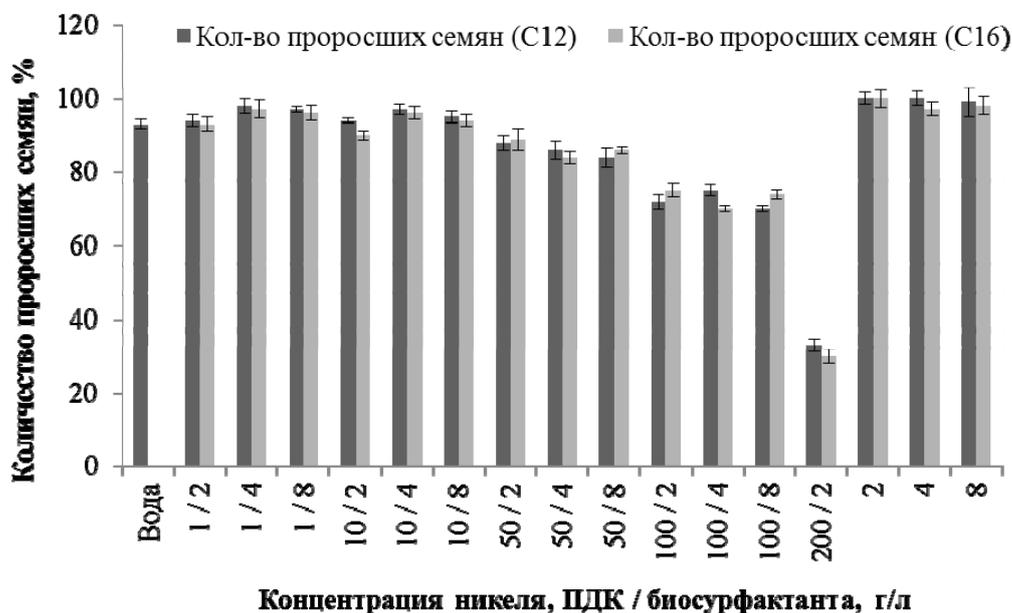


Рис. 2. Влияние биосурфактантов на всхожесть семян овса посевного в присутствии сульфата никеля (ПДК, мг/кг почвы / г/л)

Примечание. C<sub>12</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые в среде с *n*-додеканом; C<sub>16</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые в среде с *n*-гексадеканом.

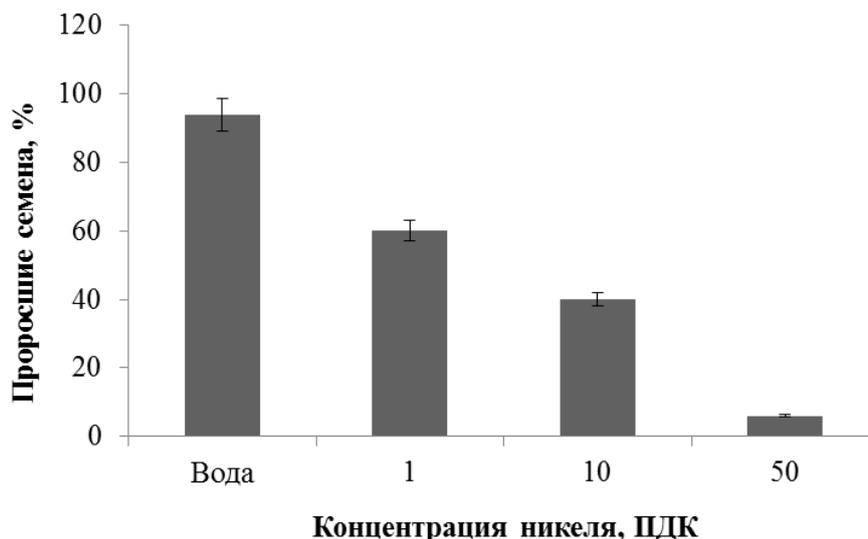


Рис. 3. Всхожесть семян горчицы белой в условиях загрязнения никелем (ПДК, мг/кг почвы)

Как видно из рис. 3, с увеличением никеля в среде прорастания уровень всхожести семян горчицы снижается. В условиях загрязнения никелем 1 ПДК всхожесть семян составляла 60 %, тогда как при концентрации 50 ПДК всхожесть семян снижалась до 6 %. Увеличение концентрации загрязнителя полностью ингибировало всхожесть семян горчицы.

Количество проросших семян при обработке их *Rhodococcus*-биосурфактантом C<sub>16</sub> выше на 4–6 %, чем *Rhodococcus*-биосурфактантом C<sub>12</sub>. Всхожесть семян горчицы происходит до 4 раз более эффективно при обработке их *Rhodococcus*-биосурфактантами, по сравнению с прорастанием тако-

вых в условиях загрязнения никелем (рис. 4). При концентрации никеля 50 ПДК без обработки семян горчицы *Rhodococcus*-биосурфактантами прорастания семян не выявлено, тогда как в условиях обработки семян *Rhodococcus*-биосурфактантами проросло до 48 % семян.



Рис. 4. Всхожесть семян горчицы белой в присутствии ионов никеля и биосурфактантов (ПДК, мг/кг почвы / г/л)

Примечание. C<sub>12</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые в среде с *n*-додеканом; C<sub>16</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые в среде с *n*-гексадеканом.

Всхожесть семян вики полевой в условиях загрязнения никелем в концентрации 10 ПДК составляла 46 %, тогда как более высокие концентрации металла полностью подавляли процесс прорастания семян (рис. 5). В условиях предварительной обработки семян *Rhodococcus*-биосурфактантами их прорастание происходило даже в условиях загрязнения среды сульфатом никеля в концентрации 200 ПДК (рис. 6).

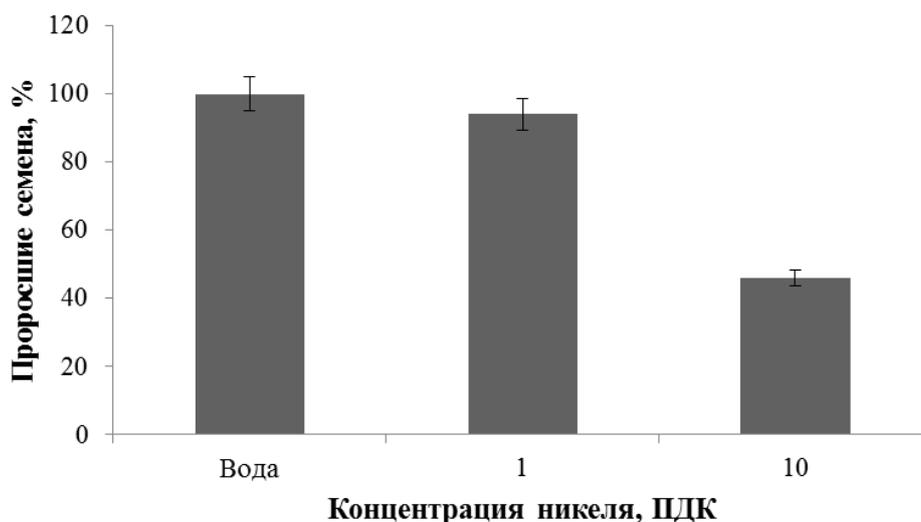


Рис. 5. Всхожесть семян вики полевой в условиях загрязнения никелем (ПДК, мг/кг почвы)



Рис. 6. Всхожесть семян вики полевой в присутствии ионов никеля и биосурфактантов (ПДК, мг/кг почвы / г/л)

Примечание. C<sub>12</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые в среде с *n*-додеканом; C<sub>16</sub> – *Rhodococcus*-биосурфактанты, продуцируемые в среде с *n*-гексадеканом.

## Заключение

Рассмотрена возможность применения сурфактантов, продуцируемых актинобактериями рода *Rhodococcus*, для снижения фитотоксичности сульфата никеля. Установлено, что наиболее устойчивым растением к действию ионов Ni<sup>2+</sup> является овес посевной, менее устойчивы проростки семян вики полевой. По степени устойчивости семян к ионам Ni<sup>2+</sup> их можно распределить в ряд: *A. sativa* L. > *V. sativa* L. > *S. alba* L. Следует отметить, что подобная закономерность была выявлена нами ранее при изучении фитотоксичности свинца в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов [13].

Всхожесть семян варьировала от 5 до 100% в зависимости от концентрации никеля в среде прорастания. Побеги и корни проростков при обработке их *Rhodococcus*-биосурфактантами C<sub>16</sub> были длиннее от 1.5 до 15 раз, по сравнению с таковым при изучении фитотоксичности ионов Ni<sup>2+</sup> в присутствии *Rhodococcus*-биосурфактантов C<sub>12</sub>. Стоит отметить, что предварительная обработка семян сельскохозяйственных культур *Rhodococcus*-биосурфактантами способствует увеличению их устойчивости к никелю даже при его концентрации в среде 200 ПДК. Данный факт связан с высокой металлхелатирующей способностью *Rhodococcus*-биосурфактантов в отношении ионов Pb<sup>2+</sup>, описанной нами ранее [9].

## Благодарности

Исследования выполнены в рамках государственного задания (01201353246 и 01201353247), поддержаны субсидией Министерства образования и науки Пермского края (МИГ) за 2019 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротченко И.С., Львова В.А. Миграция кадмия и никеля в растениях-фиторемедиантах // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. № 11-2. С. 251-254.
2. Hausinger R.P., Zamble D.B. Microbial physiology of nickel and cobalt // Microbiology Monograph. 2007. Vol. 6. P. 287-320.
3. Nies D.H. Bacterial transition metal homeostasis // Microbiology Monograph. 2007. Vol. 6. P. 117-142.

4. Приказ Министерства природных ресурсов РФ от 04.12.2014 г. № 536 «Об утверждении Критериев отнесения отходов к I – V классам опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду» (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2015 № 40330). URL: <http://publication.pravo.gov.ru> (дата опубликования: 31.12.2015).
5. Костина Л.В., Куюкина М.С., Ившина И.Б. Биосорбция, аккумуляция и способы извлечения тяжелых металлов // LAP Lambert Academic Publishing. 2010. 254 с.
6. Демченко Н.П., Калимова И.Б., Демченко К.Н. Восстановление роста и пролиферации клеток в корнях пшеницы после их ингибирования сульфатом никеля // Физиология растений. 2013. Т. 60, № 5. С. 678-690.
7. Серегин И.В., Кожевникова А.Д. Физиологическая роль никеля и его токсическое действие на высшие растения // Физиология растений. 2006. Т. 53, № 2. С. 285-308.
8. Костина Л.В. и др. Методы очистки загрязненных тяжелыми металлами почв с использованием (био)сурфактантов (Обзор) // Вестн. Пермского ун-та. Серия Биология, 2009. Вып. 10, № 36. С. 95-110.
9. Литвиненко Л.В., Тищенко А.В. Влияние *Rhodococcus*-биосурфактанта на фитотоксичность ионов свинца // Вестн. Пермского ун-та. Серия Биология, 2017. № 1. С. 80-87.
10. Ившина И.Б., Куюкина М.С., Костина Л.В. Адаптационные механизмы неспецифической устойчивости алканотрофных актинобактерий к ионам тяжелых металлов // Экология. 2013. № 2. С. 115-123.
11. ГН 2.1.7.2041-06. – Почва, очистка населенных мест, отходы производства и потребления, санитарная охрана почвы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве, 2006. URL: [http://www.gosthelp.ru/text/GN217204106\\_Predelnodopust.html](http://www.gosthelp.ru/text/GN217204106_Predelnodopust.html)
12. МР 2.1.7.2297-07. – Обоснование класса опасности отходов производства и потребления по фитотоксичности. 2007. URL: [http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/52/52957/](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/52/52957/).
13. Ivshina I.B., Kuyukina M.S., Philp J.C., Christofi N. Oil desorption from mineral and organic materials using biosurfactant complexes produced by *Rhodococcus* species // World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1998. Vol. 14. P. 711-717.
14. Kuyukina M.S. et al. Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl-tertiary butyl ether extraction // Journal Microbiology Method. 2001. Vol. 46. P. 149-156.

Поступила в редакцию 31.10.2018

Литвиненко Людмила Викторовна, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории алканотрофных микроорганизмов  
«Институт экологии и генетики микроорганизмов Уральского отделения Российской академии наук» – филиал ФГБУН «Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук»  
614081, Россия, г. Пермь, ул. Голева, 13  
E-mail: lkostina@list.ru

Тищенко Артём Валерьевич, аспирант биологического факультета  
ФГБОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»  
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15  
E-mail: arty.tishchenko@gmail.com

**L.V. Litvinenko, A.V. Tishchenko**

#### **STUDYING OF PHYTOTOXICITY OF NICKEL ASSISTED WITH *RHODOCOCCLUS*-BIOSURFACTANTS**

The effect of nickel on the germination of seeds of agricultural plants common vetch (*Vicia sativa* L.), white mustard (*Sinapis alba* L.) and oats (*Avena sativa* L.) in the presence of *Rhodococcus*-biosurfactants was studied. Biosurfactants contribute to suppression of the negative effects of nickel due to their desorption from soil components, followed by the formation of stable biosurfactant-metal complexes, and also stimulate the growth of the root system of plants. A decrease (up to 4 times) in nickel phytotoxicity in the presence of *Rhodococcus*-biosurfactants was found. It was established that pretreatment of seeds of plants with *Rhodococcus* biosurfactants leads to an increase up to 21 times in germination energy and seed germination, more intensive growth of the roots and shoots of seedlings of plants under conditions of nickel contamination. The data received can be used for developing an ecologically safe method for reducing the toxic effect of nickel on the growth of plant crops: *Avena sativa* L., *Sinapis alba* L. and *Vicia sativa* L. in the presence of *Rhodococcus* biosurfactants.

**Keywords:** *Rhodococcus*-biosurfactants, nickel sulphate, heavy metals, resistance, *Vicia sativa* L., *Sinapis alba* L., *Avena sativa* L.

## REFERENCES

1. Korotchenko I.S., L'vova V.A. [Migration of cadmium and Nickel in plants-phytoremediation] in *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij*, 2015, no. 11-2, pp. 251-254 (in Russ.).
2. Hausinger R.P., Zamble D.B. Microbial physiology of nickel and cobalt, in *Microbiology Monograph*, 2007, vol. 6, pp. 287-320.
3. Nies D.H. [Bacterial transition metal homeostasis] in *Microbiology Monograph*, 2007, vol. 6, pp. 117-142.
4. *Prikaz Ministerstva prirodnyh resursov RF ot 04.12.2014 goda №536 "Ob utverzhdenii Kriteriev otnesenija othodov k I-V klassam opasnosti po stepeni negativnogo vozdejstvija na okruzhajuschuju sredu"* (Zaregistrirvano v *Minjuste Rossii 29.12.2015 № 40330*) [Order of the Ministry of natural resources of the Russian Federation dated 04.12.2014 № 536 "on approval Of criteria for classifying waste to I-V hazard classes according to the degree of negative impact on the environment" (Registered in the Ministry of justice of Russia 29.12.2015 № 40330)], Available: <http://publication.pravo.gov.ru>. (accessed: 31.12.2015) (in Russ.).
5. Kostina L.V., Kujukina M.S., Ivshina I.B. [Biosorption, accumulation and extraction of heavy metals] in *LAP Lambert Academic Publishing*, 2010, 254 p. (in Russ.).
6. Demchenko N. P., Kalimova I. B., Demchenko K. N. [Restoration of cell growth and proliferation in wheat roots after inhibition by nickel sulfate] in *Fiziologija rastenij*, 2013, vol. 60, no. 5, pp. 678-690 (in Russ.).
7. Seregin I.V., Kozhevnikova A.D. [Physiological role of nickel and its toxic effect on higher plants] in *Fiziologija rastenij*, 2006, vol. 53, no. 2, pp. 285-308 (in Russ.).
8. Kostina L.V. and oth. [Methods of purification of soils contaminated with heavy metals using (bio)surfactants (review)] in *Vestnik Permskogo universiteta. Serija Biologija*, 2009, iss. 10, no. 36, pp. 95-110 (in Russ.).
9. Litvinenko L.V., Tishchenko A.V. [Effect of *Rhodococcus* biosurfactant on phytotoxicity of lead ions] in *Vestnik Permskogo universiteta. Serija Biologija*, 2017, no. 1, pp. 80-87 (in Russ.).
10. Ivshina I.B., Kujukina M.S., Kostina L.V. [Adaptive mechanisms of non-specific resistance of alkanotrophic actinobacteria to heavy metal ions] in *Ekologija*, 2013, no. 2, pp. 115-123 (in Russ.).
11. *GN 2.1.7.2041-06. - Pochva, ochistka naseleennyh mest, othody proizvodstva i potreblenija, sanitarnaja ohrana pochvy. Predel'no dopustimye koncentracii (PDK) himicheskikh veschestv v pochve* [GN 2.1.7.2041-06. - Soil, cleaning of populated areas, waste production and consumption, sanitary protection of soil. Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in soil], [Elektronnyj resurs], 2006, Available URL: [http://www.gosthelp.ru/text/GN217204106\\_Predelnodopust.html](http://www.gosthelp.ru/text/GN217204106_Predelnodopust.html) (accessed 09.09.2018) (in Russ.).
12. *MR 2.1.7.2297-07. - Obosnovanie klassa opasnosti othodov proizvodstva i potreblenija po fitotoksichnosti* [MR 2.1.7.2297-07. - Rationale of hazard class of waste production and consumption by phytotoxicity], 2007, Available: URL:[http://www.ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/52/52957/](http://www.ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/52/52957/) (accessed: 09.09.2018) (in Russ.).
13. Ivshina I.B., Kuyukina M.S., Philp J.C., Christofi N. Oil desorption from mineral and organic materials using biosurfactant complexes produced by *Rhodococcus* species, in *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 1998, vol. 14, pp. 711-717.
14. Kuyukina M.S. et al. Recovery of *Rhodococcus* biosurfactants using methyl-tertiary butyl ether extraction, in *Journal Microbiology Method*, 2001, vol. 46, pp. 149-156.

Received 31.10.2018

Litvinenko L.V., Candidate of Biology, Researcher of the Laboratory of Alkanotrophic Microorganisms  
Institute of Ecology and Genetics of Microorganism Ural Branch Russian Academy of Sciences –  
Branch of the Perm Federal Research Centre of the Branch of the Russian Academy of Sciences.  
13, Goleva st., Perm, Russia, 614081  
E-mail: lkostina@list.ru

Tishchenko A.V., postgraduate student of the biological faculty  
Perm State University  
15, Bukireva st., Perm, Russia, 614990  
E-mail: arty.tishchenko@gmail.com